تأثیر الیاف فولادی بر ترک خمشی و گسترش ترک در تیرهای بتن مسلح دارای وصله★

آرش کریمی‌پور[۱] محمدرضا اصفهانی[۲]

چکیده *در این پژوهش، تأثیر افزودن درصد حجمی مختلف از الیاف فولادی در تیرهای دارای طول وصلهٔ آرماتور کششی مختلف بر ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک‌ها تحت بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. هدف از انجام این بررسی کاهش حداقل عرض ترک‌خوردگی به‌ازای افزودن الیاف فولادی در تیر بتن مسلح دارای وصلهٔ آرماتور کششی بود. ده نمونه تیر آزمایشگاهی به عرض مقطع ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۲۳۰۰میلی‌متر با طول وصلهٔ میلگرد کششی مختلف و درصد متفاوتی از الیاف فولادی ساخته شد. چهار عدد از نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی و شش عدد تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار داده شد. از بین نمونه‌ها یک نمونه به‌عنوان نمونهٔ شاهد و فاقد وصله و الیاف فولادی بود. در نه نمونهٔ دیگر از الیاف فولادی با درصد حجمی ۰، ۱ و ۲ استفاده شده بود. آزمایش‌ها به‌صورت خمش چهارنقطه‌ای انجام شد. در آزمایش‌ها، مسیر گسترش ترک‌خوردگی در طول تیر و عرض ترک‌خوردگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن الیاف فولادی سبب کاهش لغزش آرماتورهای کششی در محل وصله می‌شود و عرض ترک‌خوردگی‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین با افزودن الیاف فولادی از ۱ به ۲ درصد حجمی، ترک‌ها به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی بتن الیافی، بارگذاری چرخه‌ای، ترک‌خوردگی، وصلهٔ آرماتورهای کششی.

Effect of Steel Fibers on Flexural Cracking of Fiber Reinforced Concrete Beams with Lap-Spliced Bars

A. Karimipour M. Reza Esfahani

Abstract *In this research, the effect of steel fibers on flexural cracking of fiber reinforced concrete beams with lap-spliced bars under static and loading/unloading cycles was investigated. Ten specimens of laboratory beam with the section width of 150mm, height of 200mm and length of 2300mm and with different splice lengths of tension rebars and different percentages of steel fibers were manufactured and tested. Four specimens were subjected to static loads and six specimens were subjected to loading/unloading cycles. Among the specimens, one was selected as the control specimen without having lap-spliced bars and steel fibers. Other 9 specimens were made using steel fibers with different volumetric percentages of 0, 1 and 2. The specimens were conducted under four-point bending tests. It was shown that the flexural crack width in beams decreases with increasing the volume percentage of steel fiber, significantly. Steel fibers in specimens subjected to static loading and loading/unloading cycles increased the energy dissipation.*

Key Words Steel fibers, Flexural cracking, Concrete beams, Spliced bars.

★تاریخ دریافت مقاله۹۵/۱۱/۹ تاریخ پذیرش آن ۹۶/۸/۲۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: استاد گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. Email: Esfahani@um.ac.ir

مقدمه

علل برخی خرابی‌ها در تیرها و ستون‌ها خوردگی آرماتورها و کاهش سریع مقاومت خمشی است. ضعف بتن درمقابل کشش سبب ترک‌خوردگی نمونهٔ بتن مسلح می‌شود و امکان نفوذ مواد شیمیایی را در اعضای بتنی امکان‌پذیر می‌سازد. این امر می‌تواند سبب زنگ‌زدگی و خوردگی آرماتورها شود. در تیرهای دارای وصلهٔ آرماتور کششی کاهش مقاومت پیوستگی و لغزش آرماتور می-تواند سبب افزایش ترک‌خوردگی و عرض ترک شود. باتوجه به مسیر گسترش ترک‌خوردگی و عرض آنها الگوهای خوردگی و فرسایش برای تیرهای بتن مسلح تحت شرایط محیطی متفاوت تعیین شده‌است. ورود مواد اسیدی درطی ترک‌خوردگی‌ها خطر گسیختگی تیر را افزایش می‌دهد که با افزایش پوشش روی بتن و یا استفاده از بتن با مقاومت بالاتر می‌تواند تا حدودی رسیدن این مواد به آرماتورها را کاهش دهد [1]. افزایش کرنش در آرماتورهای طولی و کاهش مقاومت بتن سبب افزایش بیشتر لغزش آرماتور در بتن می‌شود و عرض ترک‌خوردگی‌ها افزایش می‌یابد [2]. آیین‌نامه‌ها معمولاً در شرایط مختلف بهره‌برداری عرض ترک را در حدود ۰,۱ تا ۰,٤ میلی‌متر محدود می‌کنند. ACI-224R [۳] محدودهٔ مجاز عرض ترک‌خوردگی را در شرایط بهره-برداری گوناگون براساس جدول (۱) بیان می‌کند.

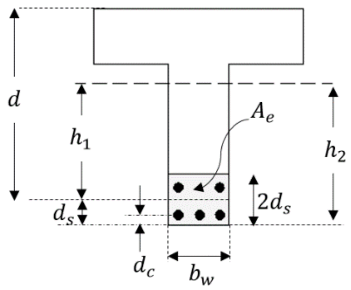
جدول ۱ حداکثر مجاز عرض ترک‌خوردگی براساس ACI 224

شرایط محیطی عضو	عرض مجاز ترک (mm)
هوای خشک	۰,٤۱
هوای مرطوب با خاک	۰,۳۰
مواد شیمیایی یخ‌زدا	۰,۱۸
آب دریا و یا پاشش آب دریا	۰,۱۵
مخازن محتوی آب	۰,۱۰

تعیین عرض ترک‌خوردگی به‌طور دقیق امکان‌پذیر نیست و به مسائل مختلفی وابسته است. روابط تجربی زیادی توسط محققان برای تعیین عرض ترک ارائه شده‌است. در این میان رابطهٔ تجربی گرگلی- لوتز [4] در تعیین عرض ترک خمشی از اعتبار بیشتری برخوردار است. رابطهٔ گرگلی- لوتز عرض ترک خمشی، w را برحسب میلی‌متر، به‌صورت زیر تعیین می‌کند:

$$w = (1.08 \times 10^{-5})\beta_h f_s \sqrt[3]{d_c A} \qquad (۱)$$

در این رابطه β_h نسبت فاصلهٔ محور خنثی از دورترین تار کششی به‌فاصلهٔ تار خنثی از مرکز سطح میلگردهای کششی $(\frac{h_1}{h_2})$ است و f_s تنش در فولادهای کششی مقطع تا مرکز نزدیک‌ترین میلگرد کششی و A سطح کششی مؤثر بتن پیرامونی میلگرد کششی است که از تقسیم سطح مقطع مؤثر بتن پیرامونی فولادهای کششی $(A_e = 2d_s b_w)$ بر تعداد میلگردهای کششی N به‌دست می‌آید $(A = \frac{A_e}{N})$. متغییرهای مورد استفاده در رابطهٔ (۱) در شکل (۱) نشان داده شده‌است.



شکل ۱ نمایش متغییرهای به‌کاررفته در تعیین عرض ترک‌خوردگی خمشی براساس رابطهٔ گرگلی- لوتز [4]

لازم به ذکر است که در جای‌گذاری کمیت β_h در رابطهٔ (۱) می‌توان به‌جای یک محاسبهٔ دقیق‌تر از مقدار ۱-۲ در تیرها و ۱,۳۵ در دال‌های یک‌طرفه استفاده کرد. همچنین منطقی خواهد بود که از مقدار $f_s \approx 0.6f_y$ به‌جای یک محاسبهٔ دقیق‌تر در تعیین تنش فولاد کششی تحت بارهای بدون ضریب استفاده شود.

حداکثر عرض ترک‌خوردگی در یک عضو بتن‌آرمه تحت کشش مستقیم را نیز می‌توان براساس رابطهٔ برومز–لوتز [۵] به‌صورت زیر تعیین کرد:

$$w_{max} = (1.45 \times 10^{-5}) f_s \sqrt[3]{d_c A} \qquad (۲)$$

افزون بر این، بااستفاده از افزودنی‌هایی نظیر الیاف پلی پروپیلن و پوزولان یا راهکارهایی نظیر افزایش مقاومت بتن، می‌توان عرض ترک‌خوردگی‌ها و گسترش امتداد آنها را کاهش داد. استفاده از ورق‌های FRP می‌تواند سبب افزایش ظرفیت خمشی تیر بتن مسلح شود و با انتقال مناسب تنش در سراسر میلگردهای کششی باعث کاهش ترک‌خوردگی در تیرهای بتن مسلح گردد [6]. رسیدن اکسیژن به آرماتور سبب اکسایش آن می‌شود و باعث ترک‌خوردن آرماتور و درنهایت آن گسیختگی می‌گردد. ازاین‌رو، استفاده از پوشش اپوکسی برروی میلگردها می‌تواند سبب مقاومت دربرابر اکسایش و خوردگی شود [7]. افزودن الیاف فولادی بر بتن مسلح با افزایش مقاومت پیوستگی و کاهش لغزش آرماتور می-تواند سبب کاهش عرض ترک‌خوردگی شود. در تیرهای دارای وصله به‌دلیل ایجاد وصله، لغزش آرماتور بیشتر می‌شود و همین امر سبب افزایش عرض ترک‌خوردگی در محل ایجاد وصلهٔ آرماتور کششی می‌شود. استفاده از این الیاف باعث ایجاد پیوستگی بهتر بین میلگرد و بتن می‌شود و سبب بهبود عملکرد این دو مصالح در مجاورت هم می‌گردد [8]. از مزایای استفاده از این الیاف می‌توان به افزایش پیوستگی بهتر میلگرد و بتن، افزایش مقاومت کششی، افزایش مقاومت دربرابر بارهای ضربه‌ای و کاهش گسترش ترک‌ها اشاره کرد. درطی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ ساخت این الیاف به‌طور عمده آغاز شد. از چهل سال پیش به‌مرور زمان الیاف به‌عنوان مصالح افزودنی به بتن اضافه شدند [9].

الیاف به طور کلی به دو دسته الیاف فولادی و الیاف مصنوعی تقسیم‌بندی می‌شوند. الیاف مصنوعی شامل الیافی از جنس نایلون (Nylon)، پلی‌پروپلین (Polypropylene)، پلی استر (Polyester) و پلی‌اتیلن هستند. این الیاف بسته به نوع کاربردشان دارای شکل و اندازه‌های مختلفی می‌باشند [10]. استفاده از الیاف فولادی باعث کاهش عرض ترک‌خوردگی و بازتوزیع بهتر تنش می‌شود. همین امر سبب بهبود مقاومت پیوستگی آرماتورها می‌گردد. زمانی که عضو دارای الیاف تحت خمش قرار می‌گیرد، حضور الیاف فولادی سبب بهبود عملکرد عضو خمشی می‌شود. استفاده از الیاف در محل ترک‌خوردگی باعث می‌شود تا عرض ترک دیرتر گسترش یابد. در اعضای بتن مسلح، افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت خمشی و ضربه‌ای می‌شود. با افزایش درصد الیاف می‌توان افزایش مقاومت عضو بتن مسلح را بهبود بیشتری داد [11].

طول وصلهٔ نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش، طبق رابطهٔ پیشنهادی اصفهانی و کیانوش [۱۲] که تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های مختلف گذشته دارد، توسط رابطهٔ (۳) محاسبه شده‌است.

$$l_d = \frac{T}{a\sqrt{f'_c}} = \frac{A_b f_S}{a\sqrt{f'_c}} \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳)، A_b و f_S به‌ترتیب مساحت آرماتورهای طولی و تنش کششی آرماتور هستند. زمانی-که آرماتور به تسلیم برسد، در رابطهٔ (۳) از f_y استفاده می شود و $a = 7.2 d_b \frac{\frac{c}{d_b}+0.5}{\frac{c}{d_b}+3.6}$. زمانی در رابطهٔ (۳) قابل قبول است که مقدار مشخصی خاموت در طول وصله قرار داده شود. برای جزئیات بیشتر به مرجع [۱۲] مراجعه شود. به‌منظور افزایش پیوستگی بین آرماتور و بتن و کاهش عرض ترک‌خوردگی، با افزودن درصد حجمی مختلف الیاف فولادی به نمونه‌ها، به تأثیر الیاف بر عرض ترک-خوردگی و نحوهٔ گسترش امتداد ترک‌ها در اعضای دارای این الیاف پرداخته شده‌است.

بررسی‌های آزمایشگاهی

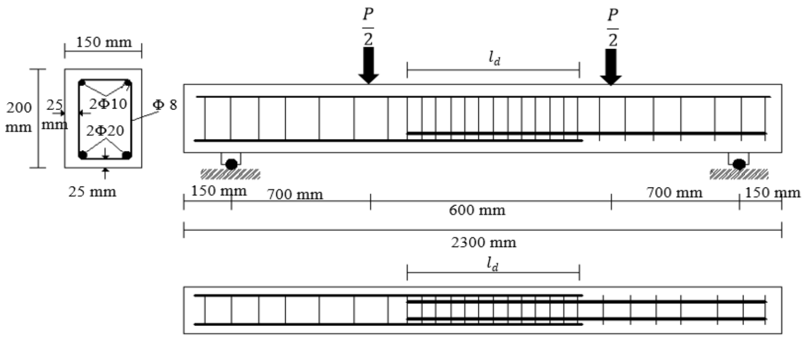
مشخصات نمونه‌ها و فرایند انجام آزمایش. در ساخت بتن الیافی از الیاف فولادی با انتهای خمیده به‌طول ۵

سانتی‌متر مطابق شکل (۲) استفاده شد. ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی و کرنش گسیختگی الیاف به‌ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال، ۲،۰ گیگاپاسکال و ۳ درصد بود.



شکل ۲ الیاف فولادی مصرفی

در این پژوهش، ۱۰ عدد نمونه تیر بتن مسلح با ارتفاع مقطع ۲۰۰، عرض مقطع ۱۵۰ و طول ۲۳۰۰ میلی‌متر و دارای درصد حجمی متفاوتی از الیاف فولادی ساخته شد و تحت بارگذاری چهارنقطه‌ای استاتیکی و چرخه‌ای قرار گرفت. ۹ عدد از نمونه‌ها دارای وصله و یک نمونه به‌عنوان نمونهٔ شاهد فاقد وصله بود. همچنین چهار عدد از نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی و شش نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی در شکل (۳) و جدول (۲) ارائه شده‌است.



شکل ۳ ابعاد هندسی نمونه‌ها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه و بارگذاری

جدول ۲ طول وصله، درصد الیاف فولادی و نحوهٔ بارگذاری نمونه‌ها

نام نمونه	درصد الیاف فولادی (٪)	طول وصله
بارگذاری استاتیکی		
$W/o-St-0\%$	۰	–
$0.8l_d-St-0\%$	۰	$0.8l_d$
$0.8l_d-St-1\%$	۱	$0.8l_d$
$0.8l_d-St-2\%$	۲	$0.8l_d$
بارگذاری چرخه‌ای		
$0.8l_d-Cyc-0\%$	۰	$0.8l_d$
$0.8l_d-Cyc-1\%$	۱	$0.8l_d$
$0.8l_d-Cyc-2\%$	۲	$0.8l_d$
$l_d-Cyc-0\%$	۰	l_d
$l_d-Cyc-1\%$	۱	l_d
$l_d-Cyc-2\%$	۲	l_d

در جدول (۲)، l_d طول وصلهٔ محاسباتی است که توسط رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود، i% درصد الیاف فولادی مصرفی، St و Cyc به‌ترتیب بیانگر بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای است. آرایش میلگردها در تمام نمونه‌ها یکسان بوده‌است و مساحت آرماتورهای فشاری و کششی در نمونه‌ها به‌ترتیب ۱۵۷ و ٦۲۸ میلی‌متر مربع است. فاصلهٔ آرماتورهای کششی و فشاری از دورترین تارهای فشاری مقطع، به‌ترتیب برابر با ۱٦۲ و ۲۵ میلی‌متر است و طول وصلهٔ کششی توسط رابطهٔ (۳)، ٤۳۰ میلی‌متر محاسبه شده‌است. این طول وصلهٔ کششی در نمونه‌هایی که طول وصلهٔ آنها برابر $0.8l_d$ کاهش داده شده، معادل ۳٤۰ میلی‌متر درنظر گرفته شده‌است. آرماتورهای مورد استفاده در نمونه‌ها تحت آزمایش کشش مستقیم بررسی شده و مشخصات آنها در جدول (۳) ارائه شده‌است.

نمونه‌های عمل‌آوری‌شده بعد از رسیدن به مقاومت ۲۸روزه مورد آزمایش قرار داده شدند. طرح اختلاط بتن ساده و الیافی مورد استفاده در این بررسی در جدول (٤)، ارائه شده‌است. در نمونه‌های دارای ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به‌ترتیب ٦ و ۱۱ کیلوگرم است.

*بزرگ‌ترین اندازهٔ سنگدانه ۱۸ میلی‌متر است. برای حصول اطمینان از مقاومت نمونه‌های مورد نظر، از هر نمونه ۳ نمونهٔ استوانه‌ای تحت آزمایش فشار قرار داده شدند. متوسط مقاومت فشاری ۳ نمونهٔ استوانه‌ای از هر نمونهٔ اصلی، به‌عنوان مقاومت فشاری آن نمونه منظور شد. نتایج مربوط به متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۵)، ارائه شده‌است.

جدول ۳ نتایج آرماتورهای کششی

قطر آرماتور (mm)	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	کرنش تسلیم ٪	کرنش نهایی ٪	مدول الاستیسیته (Gpa)
۸	۳۷۱	٥٦۰	۱۲,۹٤٦٥	۲٤,۹۱	۲۰۹,۲۸۷
۱۰	٤۰۸	٦۷۷	۱۳,۰٤٤٦	۲٥,٥۱	۲۱۰,۱۰۷
۲۰	۳۷۱	٥٦۱	۱٥,۲۷	۲٥,۸۲	۲۱۳,۱۷۸

جدول٤ طرح اختلاط بتن

نوع بتن	بتن معمولی				
مصالح	نخودی	ماسه	سیمان	فوق‌روان‌کننده	آب
مقدار مورد نیاز در هر متر مکعب(kg)	۸۲۰,۸*	۹٥۰	٤۰۰	۲	۱٦٤
	بتن الیافی				
مصالح	نخودی	ماسه	سیمان	فوق‌روان‌کننده	آب
مقدار مورد نیاز در هر متر مکعب(kg)	۸۲۰,۸*	۹٥۰	٤۰۰	۳	۱٦٤

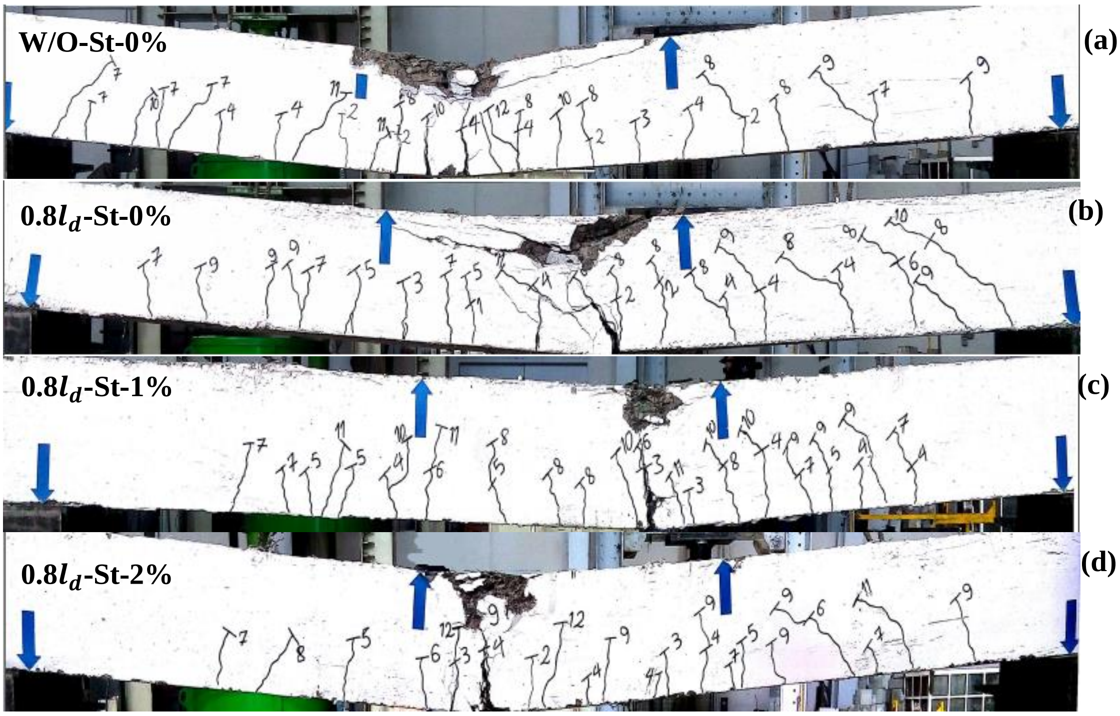
جدول ٥ مقاومت فشاری بتن در نمونه‌ها

نام نمونه	متوسط مقاومت فشاری (MPa)
W/O-St-0%	٣٦,٠
l_d-Cyc-0%	٣٦,٠
l_d-Cyc-1%	٣٩,٠
l_d-Cyc-2%	٣٦,٠
$0.8l_d$-St-0%	٣٧,٣
$0.8l_d$-St-1%	٣٥,٧
$0.8l_d$-St-2%	٣٥,٣
$0.8l_d$-Cyc-1%	٣٥,٠
$0.8l_d$-Cyc-2%	٣٥,٣
$0.8l_d$-Cyc-0%	٣٧,٣



شکل ٤ خط‌کش مدرج اندازه‌گیری عرض ترک‌خوردگی

بارگذاری چهار نمونهٔ $W/o-St-0\%$، $0.8l_d-St-0\%$، $0.8l_d-St-1\%$ و $0.8l_d-St-2\%$، بارگذاری به‌صورت استاتیکی انجام شد. نمونهٔ اول به‌عنوان نمونهٔ شاهد و فاقد وصله و الیاف بود. در ٣ نمونهٔ دیگر طول وصلهٔ محاسباتی به‌مقدار ٢٠٪ کاهش داده شد تا اثر الیاف فولادی بر رفتار وصله مشخص شود. با کاهش طول وصله، درصدهای مختلف الیاف فولادی به نمونه‌ها افزوده شد. بار محاسباتی، بار کل جک بود. بارگذاری تا لحظهٔ نهایی گسیختگی تیر افزایش داده شد. با افزایش بار و تغییر شکل تیر، عرض ترک‌ها افزایش یافت و امتداد ترک گسترش بیشتری پیدا کرد. با افزودن الیاف می‌توان با بهبود مقاومت پیوستگی، ظرفیت خمشی و بیشترین تغییرمکان عضو را بهبود داد. در این نمونه‌ها به‌کمک خط‌کش مدرج اندازه‌گیری عرض ترک‌خوردگی‌ها مطابق شکل (٤)، حداکثر عرض ترک‌خوردگی در لحظهٔ نهایی اندازه‌گیری شد. افزون بر این تأثیر توأم ایجاد وصلهٔ آرماتور کششی و استفاده از الیاف بر ترک‌خوردگی‌ها و مسیر گسترش ترک‌ها مشخص شد که در شکل (٥) نشان داده شده‌است.



شکل ۵ مسیر گسترش ترک‌خوردگی در نمونه‌ها تحت بار استاتیکی

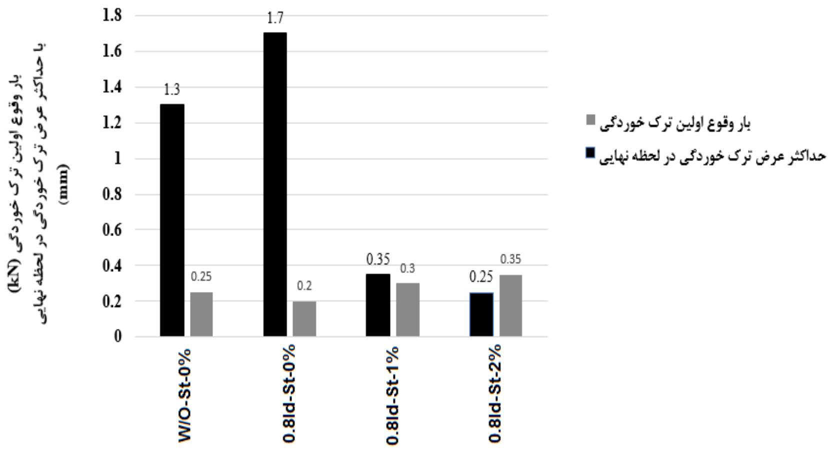
مطابق شکل (۵– a)، در نمونهٔ شاهد (W/O-St-0%)، به‌دلیل یکپارچه‌بودن آرماتور و توزیع تنش در سراسر آرماتور کششی ترک‌خوردگی در تمام طول تیر اتفاق افتاد. در این نمونه با افزایش بار، ترک‌خوردگی‌ها در وسط دهانه و در ناحیهٔ حداکثر لنگر خمشی آغاز شد. با افزایش بار توأم با گسترش امتداد ترک‌ها در وسط دهانه، ترک‌خوردگی به‌شکل مورب و از نزدیکی تکیه‌گاه آغاز شد. با افزایش مجدد بار اعمالی، با گسترش امتداد ترک‌خوردگی تا نزدیک تار خنثای مقطع و افزایش ترک‌خوردگی‌های مورب، نمونه گسیخته شد. در نمونهٔ $0.8l_d - St - 0\%$ شکل (b-۵)، به‌دلیل ناکافی بودن طول وصله، مقاومت پیوستگی کاهش یافت و لغزش در آرماتورهای کششی بیشتر شد. با افزایش لغزش آرماتورهای کششی عرض ترک‌ها افزایش بیشتری پیدا کرد و تمرکز ترک‌خوردگی در وسط دهانهٔ تیر و در ناحیهٔ با بیشترین لنگر خمشی و وصله اتفاق افتاد. در این نمونه نسبت به نمونهٔ شاهد (W/O-St-0%) با افزایش بار امتداد ترک‌ها افزایش بیشتری یافت و تا دورترین تارهای فشاری مقطع امتداد پیدا کرد و تیر به‌صورت سریع و ناگهانی گسیخته شد.

در این نمونه ترک‌های مورب افزایش یافت و گسترش آنها نسبت به نمونهٔ شاهد بیشتر بود. در شکل (c–۵) و d ($0.8l_d - St - 0\%$و$0.8l_d - St - 0\%$) با افزودن الیاف فولادی به نمونهٔ بتن مسلح، پیوستگی بین آرماتور و بتن افزایش یافت و آرماتورهای کششی کمتر در داخل نمونه لغزش کردند. ازاین‌رو با بازتوزیع بهتر تنش، ضمن تمرکز ترک‌خوردگی در وسط دهانه، ترک-های مورب کاهش یافتند و با افزایش بار امتداد ترک-خوردگی‌ها گسترش کمتری پیدا کردند. در این دو حالت نیز ترک‌خوردگی از ناحیهٔ حداکثر لنگر خمشی و در محل وصله آغاز شد. با اعمال بار بیشتر، ترک‌خوردگی مجدداً از دورترین تارهای کششی مقطع بروز کرد و با افزایش امتداد ترک‌های قبلی تیر گسیخته شد. مطابق شکل(۵–d)، با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی به مقدار ۲ درصد حجمی، ترک‌خوردگی کاهش بیشتری یافت و در لحظهٔ نهایی ترک‌ها تا تار خنثای مقطع امتداد پیدا کردند.

در شکل (٦) حداکثر عرض ترک‌خوردگی و بار متناظر با اولین ترک‌خوردگی و در جدول (٦) مقایسهٔ عرض ترک خمشی نشان داده شده‌است.

مطابق شکل (٦)، با افزودن الیاف فولادی باتوجه به اجرای وصلهٔ آرماتور کششی کاهش یافته ($0.8l_d$)؛ عرض حداکثر ترک‌خوردگی در لحظهٔ نهایی کاهش قابل ملاحظه‌ای یافت و بار وقوع متناظر با اولین ترک‌خوردگی افزایش یافت. بروز ترک‌خوردگی‌ها تحت بار استاتیکی تا لحظهٔ نهایی افزایش یافت و با افزایش بار، عرض ترک-خوردگی‌ها بیشتر شد. ازاین‌رو باتوجه به لغزش احتمالی آرماتورها و تأثیر افزودن الیاف فولادی بر کاهش لغزش آرماتور و افزایش تغییرشکل نمونه‌ها در شکل‌های (٧ تا ١٠)، نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی نشان داده شده‌است.

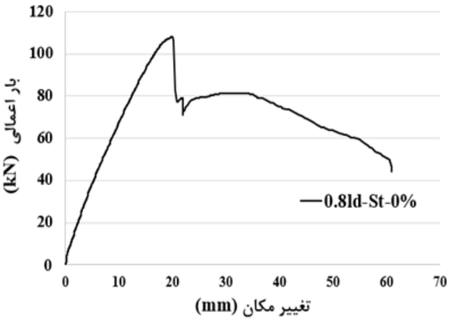
باتوجه به شکل (٨)، در نمونهٔ با وصلهٔ آرماتور کششی، پس از بار نهایی کاهش سریع ظرفیت خمشی اتفاق می‌افتاد. ازاین‌رو لغزش آرماتور زیاده بود و مطابق شکل (b-٥)، امتداد ترک‌ها افزایش بیشتری یافت. باتوجه به شکل‌های (٩ و ١٠)، با افزودن الیاف فولادی، لغزش آرماتور کاهش یافت و ضمن حفظ ظرفیت خمشی نهایی، تغییرشکل افزایش یافت. ازاین‌رو، طبق شکل‌های (c-٥ و d)، با کاهش لغزش آرماتور ترک‌خوردگی‌ها کاهش یافت.



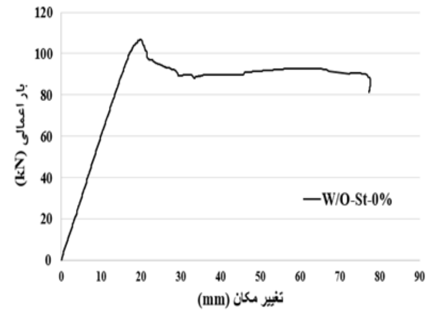
شکل ٦ حداکثر عرض ترک‌خوردگی نمونه‌ها در لحظهٔ نهایی تحت بار استاتیکی

جدول ٦ مقایسهٔ عرض ترک خمشی

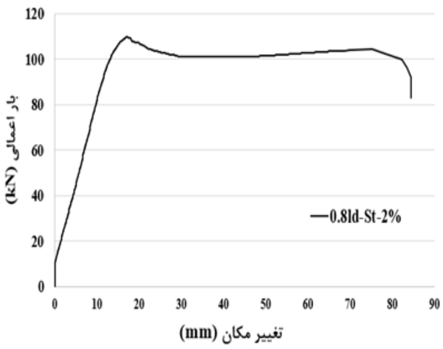
نمونه	حداکثر عرض ترک خمشی (mm)
$W/o - St - 0\%$	١,٣٠
$0.8l_d - St - 0\%$	١,٧٠
$0.8l_d - St - 1\%$	٠,٣٥
$0.8l_d - St - 2\%$	٠,٢٥
مقدار مجاز ACI [٣]	٠,٤٠
گرگلی-لوتز [٤]	٠,١٢
برومز-لوتز [٥]	٠,١٣



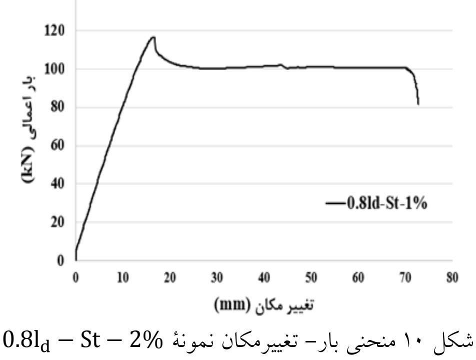
شکل ۷ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ W/O-St-0%



شکل ۸ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ $0.8l_d - St - 0\%$

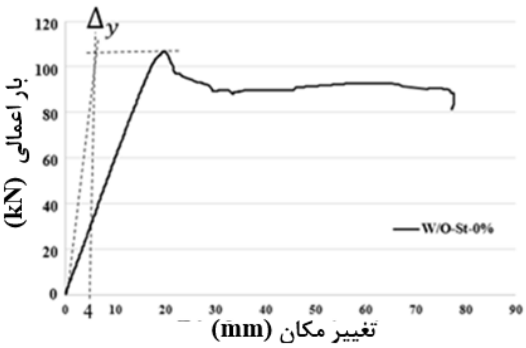


شکل ۹ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ $0.8l_d - St - 1\%$



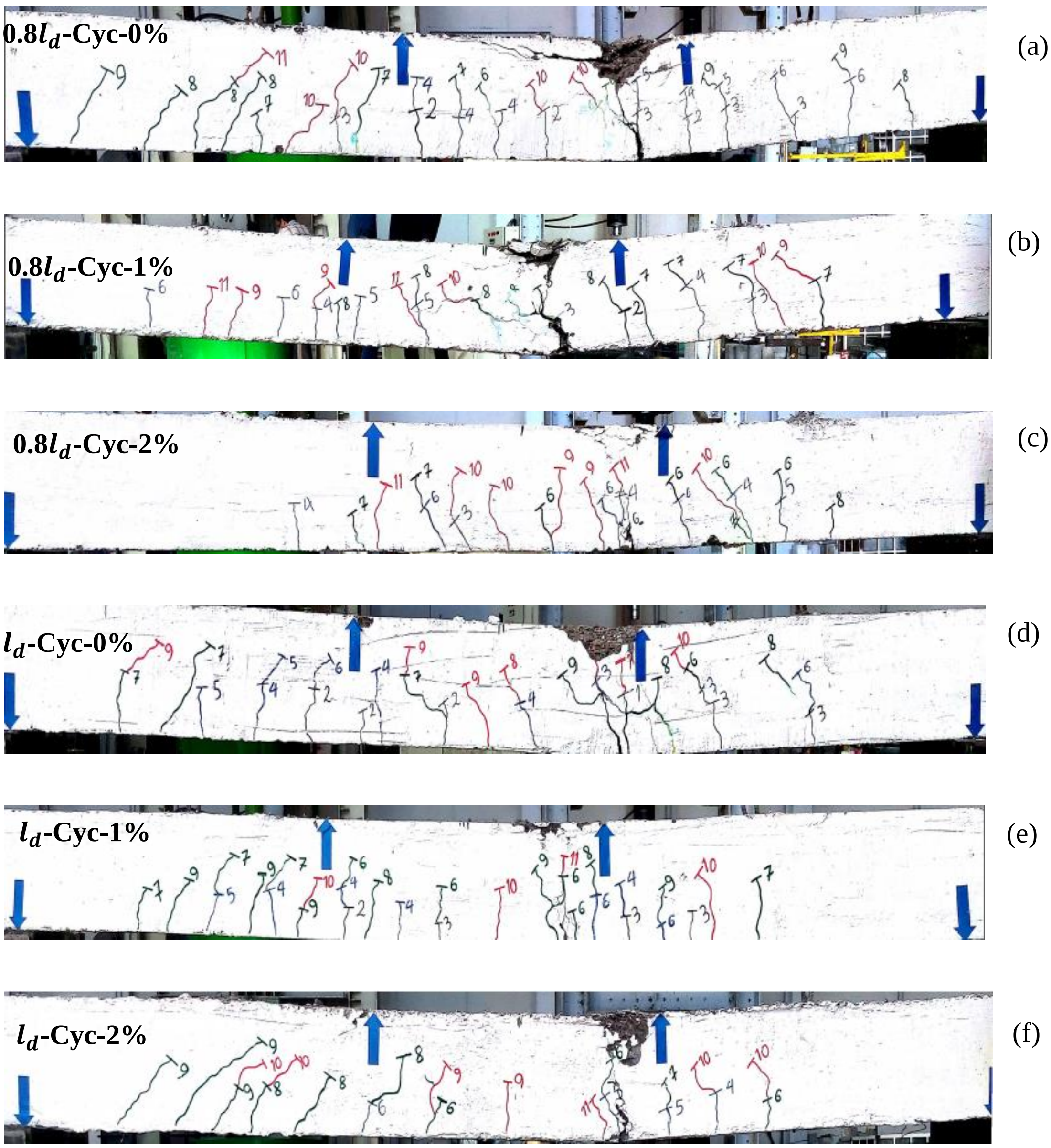
شکل ۱۰ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ $0.8l_d - St - 2\%$

در بررسی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای، ٦ نمونهٔ l_d-Cyc-0%، l_d-Cyc-1%، l_d-Cyc-2%، $0.8l_d$-Cyc-0%، $0.8l_d$-Cyc-1% و $0.8l_d$-Cyc-2% دارای وصله می‌باشند. در ۳ نمونهٔ اول، طول وصله همان طول وصلهٔ محاسباتی و در ۳ نمونهٔ دیگر طول وصله به‌مقدار ۲۰ درصد کاهش داده شده‌است. بار اعمالی چرخه‌ای از نوع کنترل تغییرمکان است. برای اعمال این بار در ابتدا باید یک تغییرمکان هدف تعیین شود. تغییر مکان هدف (Δ_y) به‌صورت تغییرمکان به‌دست‌آمده از تلاقی دو خط مماس بر نقطهٔ معادل با حداکثر ظرفیت بار اعمالی و مماس اولیه در نمودار بار- تغییرمکان نمونهٔ شاهد مطابق شکل (۱۱)، تعریف می‌شود [13].



شکل ۱۱ تعیین تغییرمکان هدف (Δ_y)

پس از تعیین تغییرمکان هدف، در چرخهٔ اول به‌اندازهٔ Δ_y، چرخهٔ دوم به‌اندازهٔ $2\Delta_y$، چرخهٔ سوم به‌اندازهٔ $3\Delta_y$ تغییرمکان به تیر داده می‌شود و همین فرایند تا شکست نهایی تیر انجام می‌شود. درنتیجه در چرخهٔ اول، بار تا تغییرمکان معادل ٤ میلی‌متر افزایش داده شد و زمانی‌که تیر به این تغییرمکان رسید، بار تا مقدار صفر برگشت داده شد. در اینجا چرخهٔ اول طی شد. بعد از صفر شدن بار، مجدداً بار تا تغییرمکان ۸ میلی‌متر افزایش داده شد. بعد از رسیدن حداکثر جابه‌جایی میانهٔ تیر به این مقدار، بار اعمالی تا مقدار صفر کاهش داده شد. تأثیر ایجاد وصله و استفاده از الیاف بر ترک‌خوردگی‌ها و مسیر گسترش ترک‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است.



شکل ۱۲ مسیر گسترش ترک‌خوردگی تحت بارگذاری چرخه‌ای

مطابق شکل (۱۲–a)، ایجاد وصلهٔ آرماتور کششی کاهش‌یافته ($0.8l_d - \mathrm{Cyc} - 0\%$)، به‌دلیل عدم تأمین مقاومت پیوستگی به‌اندازهٔ کافی، لغزش در آرماتورها اتفاق افتاد و ترک‌خوردگی در سراسر دهانهٔ تیر رخ داد. با افزایش بار اعمالی ضمن گسترش امتداد ترک-خوردگی‌ها، عرض ترک‌ها افزایش یافت و با نزدیک شدن امتداد ترک به دورترین تارهای فشاری مقطع، عضو سریع گسیخته شد. در این نمونه بیشتر تمرکز ترک-خوردگی‌ها در محل وصله بود ولی بعد از وقوع ترک‌های قائم در میانهٔ دهانه در لحظهٔ نهایی ترک‌های مایل از نزدیک تکیه‌گاه‌ها نیز ایجاد شد. باتوجه به شکل (۱۲–b و c)، در نمونه‌های $0.8\mathrm{l_d} - \mathrm{Cyc} - 1\%$ و $0.8\mathrm{l_d} -$

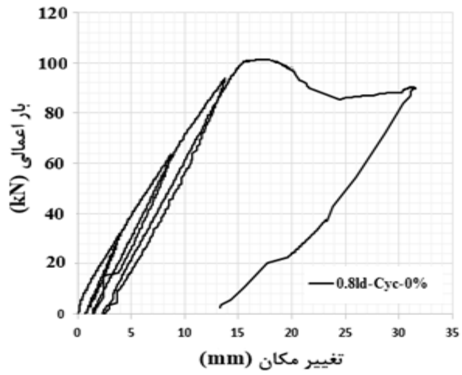
$Cyc - 2\%$ با افزودن الیاف فولادی به‌دلیل افزایش پیوستگی بین آرماتورهای کششی و بتن، لغزش بین آرماتورهای کششی و بتن کاهش یافت و ترک‌خوردگی‌ها بیشتر در وسط دهانهٔ تیر و در محل حداکثر لنگر خمشی و وصلهٔ آرماتور کششی اتفاق افتاد. افزون‌براین با افزودن الیاف فولادی بر عضو بتن مسلح، امتداد ترک‌ها و عرض ترک‌خوردگی‌ها کاهش یافت و ترک‌های جدید تحت بارگذاری بیشتر از دورترین تارهای کششی مقطع آغاز شد که همین امر سبب کاهش عرض ترک‌خوردگی پیشین و بازتوزیع بهتر تنش در طول عضو شد. باتوجه به شکل (۱۲-d تا f) نتایج به‌دست‌آمده از گسترش ترک‌خوردگی‌ها در نمونه‌های دارای وصلهٔ کاهش داده‌نشده ($0.8l_d - \mathrm{Cyc} - 0\%$ و $0.8l_d - \mathrm{Cyc} - 0\%$) مطابق با نمونه‌های دارای وصلهٔ کاهش‌یافته (شکل ۱۲-a تا c) افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت پیوستگی، کاهش لغزش آرماتور و بتن و درنهایت کاهش عرض ترک‌خوردگی‌ها شد. در این نمونه‌ها به‌دلیل کافی‌بودن طول وصلهٔ آرماتور کششی (l_d)، لغزش بین آرماتور و بتن نسبت به حالت وصلهٔ کاهش‌یافته ($0.8l_d$)، کمتر بود و همین امر نیز به‌خودی‌خود باعث کاهش عرض ترک‌خوردگی‌ها شد که با افزودن الیاف فولادی نیز بهبود بیشتری پیدا کرد. ازاین‌رو ایجاد وصلهٔ آرماتور کششی سبب تمرکز تنش می‌گردد و باعث می‌شود که ترک‌خوردگی‌ها بیشتر در محل وصله اتفاق بیفتد. با افزودن الیاف فولادی می‌توان ضعف ایجادشده به‌دلیل اجرای وصلهٔ آرماتور کششی را تا حدودی جبران کرد.

در بررسی عرض ترک‌خوردگی تحت بارگذاری چرخه‌ای، عرض ترک‌ها در هر چرخه در دو لحظهٔ انتهای بارگذاری و انتهای باربرداری به‌کمک خط‌کش مدرج اندازه‌گیری شده‌است. مقادیر ترک‌خوردگی اندازه‌گیری‌شده در جدول (۷) ارائه شده‌است.

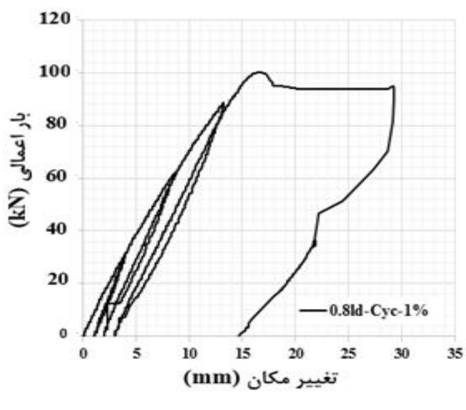
جدول ۷ ترک‌خوردگی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای

نمونه	عرض ترک‌خوردگی (mm)								بار وقوع اولین ترک‌خوردگی (ton)
	چرخهٔ اول		چرخهٔ دوم		چرخهٔ سوم		چرخهٔ چهارم		
	انتهای بارگذاری	انتهای باربرداری	انتهای بارگذاری	انتهای باربرداری	انتهای بارگذاری	انتهای باربرداری	انتهای بارگذاری	انتهای باربرداری	
$0.8l_d - Cyc - 0\%$	۰٫۲۰	۰٫۰۵	۰٫۴۵	۰٫۲۰	۲٫۱۰	۰٫۹۰	۴٫۰۰	۲٫۱۰	۱٫۰۰
$0.8l_d - Cyc - 1\%$	۰٫۱۰	۰٫۰۰	۰٫۲۵	۰٫۱۵	۰٫۶۰	۰٫۲۵	۱٫۲۰	۰٫۵۰	۲٫۰۰
$0.8l_d - Cyc - 2\%$	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۱۵	۰٫۰۵	۰٫۳۰	۰٫۲۰	۰٫۶۵	۰٫۴۰	۳٫۰۰
$l_d - Cyc - 0\%$	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۳۵	۰٫۱۰	۱٫۸۰	۰٫۷۰	۳٫۰۰	۱٫۹۰	۱٫۵۰
$l_d - Cyc - 1\%$	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۲۰	۰٫۱۰	۰٫۵۵	۰٫۲۰	۰٫۷۰	۰٫۳۵	۲٫۰۰
$l_d - Cyc - 2\%$	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۰	۰٫۰۰	۰٫۲۵	۰٫۱۵	۰٫۵۰	۰٫۳۰	۴٫۰۰

مطابق جدول (۷)، در هر چرخه و همچنین در کل چرخه ها، با افزودن الیاف فولادی پیوستگی بین آرماتور کششی و بتن افزایش یافت، عرض ترک‌ها کاهش یافت و بار معادل اولین ترک‌خوردگی افزایش یافت. در نمونهٔ $l_d - Cyc - 2\%$، ترک‌خوردگی از چرخهٔ دوم آغاز شد و در چرخهٔ اول هیچ ترک‌خوردگی رخ نداد. در هر چرخه، به هنگام بارگذاری عرض ترک‌ها باز شد و با باربرداری عرض ترک‌خوردگی بسته شد. باز و بسته‌شدن عرض ترک‌خوردگی در هر چرخه باعث اتلاف انرژی در سازه‌های بتن مسلح می‌شود. هرچه باز و بسته شدن ترک‌ها سخت‌تر باشد و شکل‌پذیری نمونه بیشتر باشد اتلاف انرژی نیز بیشتر خواهد بود. ازاین‌رو باتوجه به لغزش احتمالی آرماتورها و تأثیر افزودن الیاف فولادی بر کاهش لغزش آرماتور و افزایش تغییرشکل نمونه‌ها در شکل‌های (۱۳ تا ۱۸)، نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی نشان داده شده‌است.

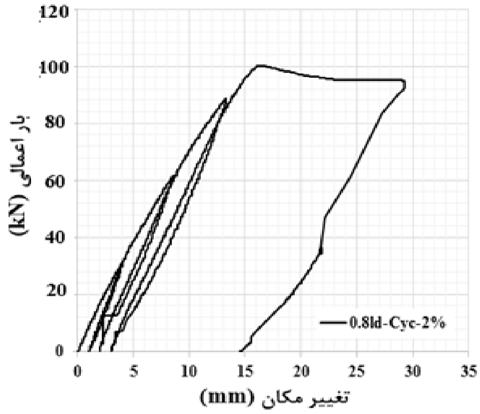


شکل ۱۳ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ $0.8l_d - Cyc - 0\%$

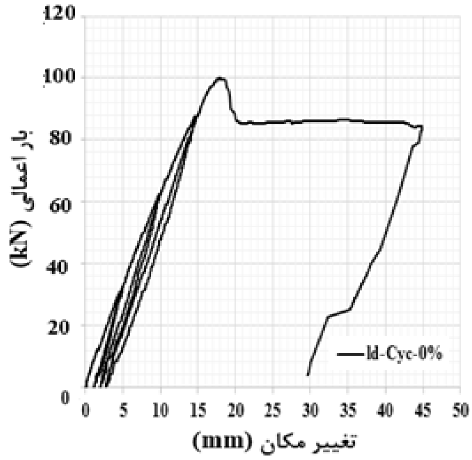


شکل ١٤ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ $0.8l_d - Cyc - 1\%$

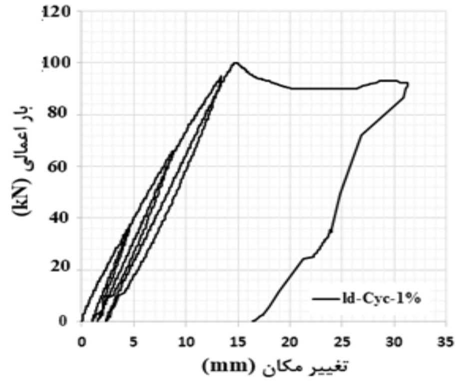
تحت بارگذاری چرخه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای



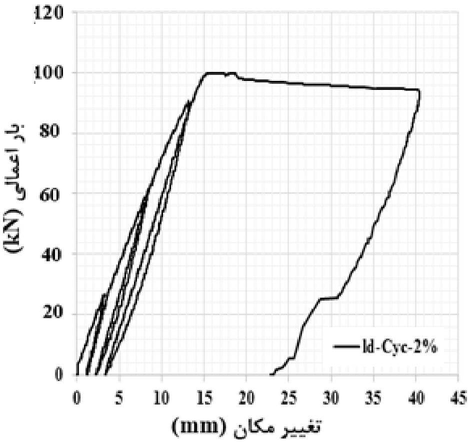
شکل ۱۵ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ
$0.8l_d - Cyc - 2\%$



شکل ١٦ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ
$l_d - Cyc - 0\%$ تحت بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۱۷- منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ $l_d - Cyc - 1\%$

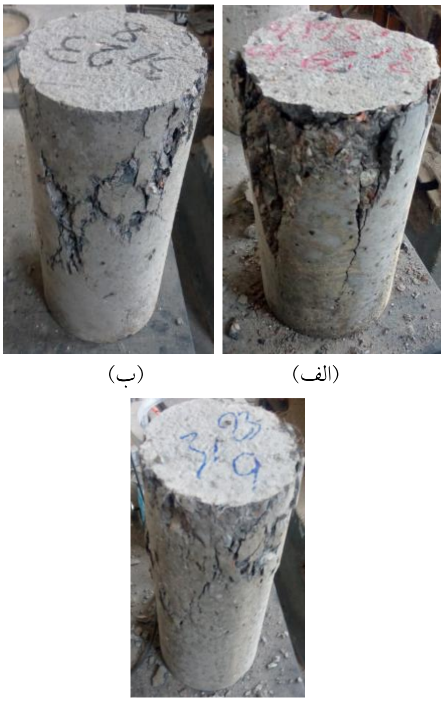


شکل ۱۸ منحنی بار- تغییرمکان نمونهٔ تحت بارگذاری چرخه‌ای

باتوجه به شکل‌های (۱۳ تا ۱۵) و شکل‌های (۱٦ تا ۱۸) با افزودن الیاف فولادی به نمونه، می‌توان طول وصلهٔ آرماتور کششی را کاهش داد بدون آنکه شکل‌پذیری کاهش یابد. همین امر نشان‌دهندهٔ کاهش لغزش آرماتور دارای وصله است. ازاین‌رو با کاهش لغزش آرماتور در بتن مطابق شکل‌های (۱۲-a تا f)، با افزودن الیاف فولادی و کاهش لغزش آرماتور، گسترش مسیر ترک‌خوردگی‌ها کاهش یافته‌است.

به‌منظور بررسی تأثیر مقاومت کششی و فشاری بتن بر رفتار تیر بتن مسلح، ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک، به‌ازای هر نمونه تیر اصلی، ٦ نمونهٔ استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر تهیه شده‌است. ۳ نمونه تحت آزمایش فشار قرار گرفت و ضمن بررسی تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری و نحوهٔ ترک‌خوردگی و گسیختگی نمونه، به تعیین منحنی تنش- کرنش نمونه‌ها پرداخته شد. ۳ نمونهٔ دیگر نیز تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (آزمایش برزیلی) قرار داده شد و ضمن تعیین حداکثر تنش کششی مجاز به نحوهٔ ترک‌خوردگی و گسیختگی نمونه‌ها پرداخته شد. در بررسی تأثیر این الیاف بر نحوهٔ ترک‌خوردگی نمونهٔ فشاری، نتایج گسیختگی در شکل (۱۹) نشان داده شده‌است.

مطابق شکل (۱۹-الف)، در نمونهٔ فاقد الیاف فولادی، با اعمال نیروی فشاری، هستهٔ نمونهٔ بتنی و پوستهٔ آن به‌ترتیب گسیخته شد و نمونهٔ استوانه‌ای گسیخته گردید. با افزودن الیاف فولادی به‌میزان ۱ و ۲ درصد حجمی نمونهٔ بتنی، هستهٔ نمونه تقویت شد و گسیختگی نمونه و تخریب پوستهٔ بتن سخت‌تر گردید. مطابق شکل (۱۹-ج) افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونهٔ بتن غیرمسلح، ترک‌هایی در پوستهٔ نمونه ایجاد شد ولی نمونه از هم فرونپاشید.

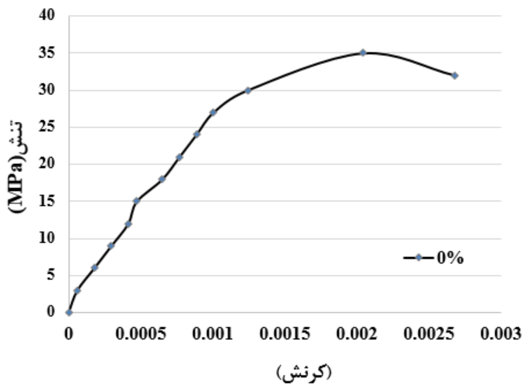


(ب) (الف)

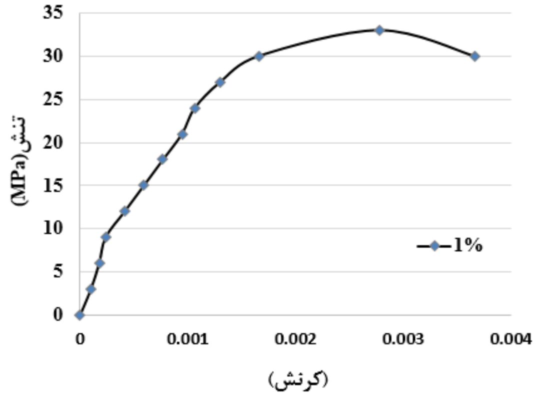
(ج)

شکل ۱۹ گسیختگی نمونهٔ فشاری: الف) فاقد الیاف فولادی، ب) دارای ۱ درصد حجمی الیاف فولادی، ج) دارای ۲ درصد حجمی الیاف فولادی

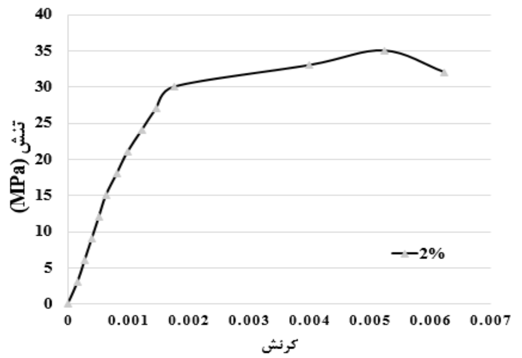
به‌منظور بررسی تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن، از هر نمونهٔ اصلی به تعداد ۳ نمونه، برای تعیین منحنی تنش- کرنش تهیه شد. در این نمونه‌ها با قراردادن کرنش‌سنج برروی نمونه ضمن ثبت تنش، کرنش‌ها نیز ثبت شد. با ثبت تنش و کرنش، منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های فاقد الیاف، ۱ درصد و ۲ درصد حجمی ترسیم شد. متوسط منحنی تنش- کرنش نمونه‌ها محاسبه و مطابق شکل‌های (۲۰ تا ۲۲) ترسیم شد.



شکل ۲۰ منحنی تنش- کرنش بتن معمولی



شکل ۲۱ منحنی تنش- کرنش بتن الیافی دارای ۱ درصد حجمی الیاف فولادی



شکل ۲۲ منحنی تنش- کرنش بتن الیافی دارای ۲ درصد حجمی الیاف فولادی

مطابق شکل‌های (۲۰ تا ۲۲)، افزودن الیاف فولادی در ابتدای بارگذاری تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر منحنی تنش- کرنش نداشت و رفتار نمونه‌ها تقریباً یکسان بود. در نمونهٔ بتن معمولی کرنش معادل بیشترین تنش بتن ۰٫۰۰۲۲٦ و بیشترین تنش ۳۵ مگاپاسکال است. با افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونهٔ بتن مطابق شکل (۲۱)، مقداری شکل‌پذیری نمونه افزایش پیدا کرد ولی حداکثر ظرفیت فشاری نمونه تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نکرد. در این حالت با افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن، کرنش معادل بیشترین تنش ۰٫۰۰۲۸۱ و بیشترین تنش ۳٤ مگاپاسکال بود. با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونهٔ استوانه‌ای، تغییرشکل افزایش زیادی داشت و سخت‌شوندگی در منحنی تنش- کرنش ایجاد شد. ازطرفی افزودن الیاف فولادی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر حداکثر ظرفیت فشاری نمونهٔ بتنی نداشت. در این حالت با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن کرنش معادل بیشترین تنش ۰٫۰۰٥٤ و بیشترین تنش ۳٥ مگاپاسکال بود. علت بروز ناحیهٔ سخت‌شوندگی در نمونهٔ بتن غیرمسلح را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در نمونه‌های بتنی با افزایش فشار ابتدا پوستهٔ بیرونی دچار ترک‌خوردگی می‌شود و سپس با اعمال بار بیشتر هستهٔ نمونه دچار ترک‌خوردگی و گسیختگی می‌شود. بروز ترک‌خوردگی از ناحیهٔ بالا و پایین نمونهٔ استوانه‌ای آغاز می‌شود و سپس به میانهٔ نمونه انتقال پیدا می‌کند. سپس با ایجاد انبساط جانبی و بروز کشش در میانهٔ نمونهٔ فشاری، نمونه گسیخته می‌شود و فرومی‌پاشد. افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود. هنگامی که نمونه از وسط دچار انبساط جانبی و کشش می‌گردد الیاف با افزایش ظرفیت کششی مانع از گسیخته شدن نمونه می‌شوند و ناحیهٔ سخت‌شوندگی در منحنی تنش- کرنش ایجاد می‌شود.

در بررسی تأثیر الیاف فولادی بر ترک‌خوردگی نمونهٔ تحت کشش غیرمستقیم، ۳ عدد نمونهٔ استوانه‌ای برای انجام آزمایش مقاومت کششی تهیه شد و تحت کشش غیر مستقیم قرار گرفت. در بررسی ترک‌خوردگی و گسیختگی نمونهٔ استوانه‌ای تحت کشش غیرمستقیم، تأثیر الیاف فولادی در شکل (۲۳) نشان داده شده‌است.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۲۳ گسیختگی کششی نمونه‌های استوانه‌ای تحت کشش غیرمستقیم

جدول ۸ نتایج بررسی‌های کشش غیرمستقیم

نمونه	حداکثر نیروی اعمالی (kN)			متوسط نیروی اعمالی (kN)	متوسط تنش کشش (MPa)
W/O-St-0%	۲۱۰,۶۰	۲۰۰,۴۰	۲۱۵,۸۰	۲۰۸,۹۳	۲,۹۵
l_d-Cyc-0%	۱۹۷,۲۰	۲۰۵,۴۰	۱۸۰,۴۰	۱۹۴,۳۳	۲,۷۵
l_d-cyc-1%	۳۶۲,۳۰	۳۷۳,۸۰	۴۲۳,۲۰	۳۸۶,۴۳	۵,۴۷
l_d-cyc-2%	۴۶۰,۶۰	۴۷۲,۵۰	۴۷۰,۳۰	۴۶۷,۸۰	۶,۶۲
0.8l_d-St-0%	۲۷۱,۳۰	۲۸۰,۷۰	۲۵۰,۴۰	۲۶۷,۴۷	۳,۷۸
0.8l_d-St-1%	۳۵۲,۱۰	۳۵۴,۱۰	۳۵۴,۸۰	۳۵۳,۶۷	۵,۰۰
0.8l_d-St-2%	۳۶۲,۰۰	۳۶۷,۹۰	۳۳۴,۰	۳۵۴,۶۳	۵,۰۱
0.8l_d-Cyc-1%	۳۰۶,۸۰	۳۱۲,۷۰	۳۰۹,۹۰	۳۰۹,۸۰	۴,۳۸
0.8l_d-Cyc-2%	۳۲۴,۸۰	۳۷۱,۸۰	۳۱۲,۷۰	۳۳۶,۴۳	۴,۷۶
0.8l_d-Cyc-0%	۱۶۴,۸۰	۲۳۰,۵۰	۲۷۷,۶۰	۲۲۴,۳۰	۳,۱۷

مطابق شکل (۲۳-الف)، کشش غیرمستقیم در نمونهٔ فاقد الیاف فولادی سبب گسیختگی نمونه و تقسیم نمونه به دو قسمت مجزا می‌شود. با افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونهٔ بتنی تحت کشش غیرمستقیم، لهیدگی و تغییرشکل ایجاد می‌گردد ولی نمونه به دو نیم تقسیم نمی‌شود. مطابق شکل (۲۳-ج) افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی باعث می‌شود تا مقاومت بتن افزایش یابد و لهیدگی در بتن کمتر شود و تنها ترک‌های مویین در پوستهٔ بیرونی نمونه رخ دهد. افزودن الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود ولی با بیشتر کردن درصد الیاف فولادی این افزایش مقاومت با شیب کمتری افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از گسیختگی نمونه‌های بتنی تحت کشش غیرمستقیم در جدول (۸) ارائه شده‌است.

مطابق جدول (۸)، افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود. با افزایش درصد الیاف فولادی این مقاومت بیشتر می‌شود. علاوه‌بر افزایش مقاومت فشاری، افزودن الیاف فولادی مانع از گسیختگی کامل نمونهٔ استوانه‌ای می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر الیاف فولادی بر ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک در عضو بتن مسلح دارای وصلهٔ آرماتور کششی تحت بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق شامل ۱۰ نمونه تیر بتن مسلح بود. عرض ترک‌خوردگی‌ها، مسیر گسترش ترک

و تأثیر افزودن الیاف فولادی بر ترک‌خوردگی و گسیختگی بتن مسلح‌نشده مورد بررسی قرار گرفت. براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از انجام این آزمایش‌ها، نتایج زیر به‌دست آمده‌است:

۱) افزودن الیاف فولادی سبب کاهش لغزش آرماتورهای کششی در محل وصله می‌شود و عرض ترک‌خوردگی‌ها را کاهش می‌دهد. با افزودن الیاف فولادی به‌میزان ۱ و ۲ درصد حجمی در نمونهٔ دارای وصلهٔ کاهش یافته ($0.8l_d$) می‌توان به‌ترتیب حداقل به‌میزان ۷۳ و ۸۰ درصد عرض ترک‌خوردگی را کاهش داد.

۲) افزودن الیاف فولادی به‌دلیل افزایش مقاومت پیوستگی باعث کاهش توزیع ترک در سراسر عضو می‌گردد و باعث تمرکز ترک‌خوردگی‌ها در میانهٔ دهانهٔ تیر و در محل وصله می‌شود.

۳) در بارگذاری چرخه‌ای افزودن الیاف فولادی سبب افزایش بار وقوع اولین ترک‌خوردگی می‌شود و حتی باعث می‌شود که در چرخه‌های ابتدایی ترک-خوردگی اتفاق نیافتد. در نمونهٔ $l_d - Cyc - 2\%$ افزودن الیاف فولادی به‌مقدار ۲ درصد حجمی باعث می‌شود تا ترک‌خوردگی از چرخهٔ دوم آغاز شود.

٤) افزودن الیاف فولادی سبب افزایش بار معادل وقوع اولین ترک‌خوردگی می‌شود.

۵) در سازه‌های بتن مسلح باز و بسته‌شدن عرض ترک-ها سبب استهلاک انرژی می‌شود. افزودن الیاف فولادی به نمونه‌های تحت بارگذاری چرخه‌ای، سبب افزایش استهلاک انرژی عضو بتن مسلح می‌شود. اضافه کردن ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونهٔ با طول وصلهٔ l_d و $0.8l_d$ به‌ترتیب سبب افزایش استهلاک انرژی به مقدار ٤، ٦، ۳٤ و ۳٦ درصد می‌گردد.

٦) افزودن الیاف فولادی به نمونهٔ بتنی غیرمسلح تحت فشار، باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود ولی در افزایش مقاومت فشاری تأثیر چشم‌گیری ندارد. افزون‌براین افزودن الیاف فولادی با تقویت هستهٔ نمونهٔ استوانه‌ای مانع از فروپاشی نمونهٔ بتنی می‌شود.

۷) اضافه‌کردن الیاف فولادی به نمونهٔ بتن غیرمسلح تحت کشش غیرمستقیم مانع از فروپاشی و جداشدگی در نمونه می‌شود. افزون‌براین افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود.

۸) با افزودن الیاف فولادی، در صورت داشتن وصلهٔ آرماتور کششی بیشینه ظرفیت خمشی نمونه کاهش محسوس پیدا نمی‌کند و افزودن الیاف ضمن افزایش پیوستگی آرماتور وصله و بتن، باعث افزایش تغییرشکل نهایی نمونه و کاهش لغزش آرماتور می-شود.

مراجع

1. Dai. L., Wang. L., Zhang. J and Zhang. X., "A Global Model for Corrosion-induced Cracking in Prestressed Concrete Structures", *engineering failure analysis*, January 23, (2016).

2. Carmo. R. N. D., Valenca. J., Silva. D and Dias-da-Costa. D., "Assessing Steel Strains on Reinforced Concrete Members from Surface Cracking Pattern" و *Construction and building materials*. pp. 265-275. 9 August, (2015).

3. ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structure, (2001).

4. Gergely. P., and Lutz. L. A., "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members, Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete", SP-20, *American Concrete Institute*, Detroit, pp. 87-

117, (1968).

5. Broms, B., Lutz., L. A. and Leroy, A., "Effects of Arrangement of Reinforcement on Crack Width and Spacing of Reinforced Concrete Members", *ACI JOURNAL*, Proceedings V. 62, No. 11, Nov. pp. 1395-1410, (1965).
6. Zomorodian., M., Yang., G., Belarbi., A. and Ayoub., A.,"Cracking Behavior and Crack Width Prediction of FRP Strengthened Rc Members under Tension", *Engineering structures.* 313-324. 27 June (2016).
7. Ji., Y., Hu., Y., Zhang., L. and Bao., Z., "Laboratory Stuies on Influence of Transvers Cracking on Chloride-induced Corrosion Rate in Concrete", *Cement & concrete Composites.* S0958-9465(15)30062-7. 26 December, (2015).
8. Lagier., F., Massicotte., B., and Charron., J. P., "Bond Strength of Tension Lap Splice Specimens in UHPFRC", *Construction and Building Materials*, 26 May, (2015).
9. Shah., P. S, "Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement Based Material", *ACI Material Journal*, Vol. 88, No. 6, Nov., (1991).
10. ACI 544.1R-02, State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete, (2002).
11. Yoo. D. y., Yoon. Y. S and Banthia. N., "Flextural Response of Steel-fiber-reinforced Reams: Effects of Strength, Fiber Constent and Strain-rate", *Cement & concrete Composites*, 25 February, (2015).
12. Esfahani., M. R. and Kianoush., M. R., "Development/Splice Length of Reinforcing Bars", *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 1, January– February, (2005).
13. Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E., and Gosh, S.K. "Behavior of Lapspliced Reinforcing Bars Embedded in High Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, pp. 826–836, doi:10.14359/737. (1999).